

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 732 477

(21) N° d'enregistrement national : 95 04072

(51) Int Cl<sup>6</sup> : G 01 W 1/00, G 01 F 9/00, G 06 F 19/00 G 06 F 169/00

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 31.03.95.

(71) Demandeur(s) : ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
AGRONOMIQUE DE RENNES ETABLISSEMENT PUBLIC A  
CARACT ADMINISTRATIF — FR.

(30) Priorité :

(72) Inventeur(s) : DUCHESNE JEAN et CUDENNEC  
CHRISTOPHE.

(43) Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 04.10.96 Bulletin 96/40.

(73) Titulaire(s) :

(56) Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : Se reporter à la fin du  
présent fascicule.

(74) Mandataire : CABINET PATRICE VIDON.

(54) PROCÉDÉ ET SYSTÈME DE DÉTERMINATION D'UN DÉBIT D'EAU À L'EXUTOIRE D'UN BASSIN VERSANT,  
PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION DE DONNÉES CORRESPONDANT.

(57) L'invention concerne un procédé de détermination  
d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant. Selon l'in-  
vention, ce procédé comprend:

\* une phase d'initialisation (21), comprenant les étapes  
suivantes:

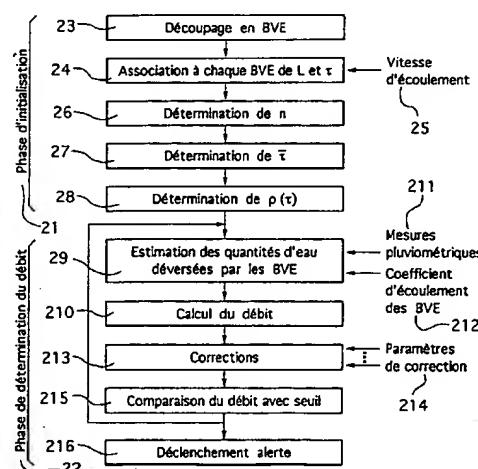
- découpage (23) du bassin versant en un ensemble de  
bassins versants élémentaires (BVE);

- association (24) à chacun des BVE d'une première donne-  
née représentative de la distance hydraulique (L) entre le  
BVE et l'exutoire, et d'une seconde donnée représentative  
de la durée de parcours (τ) de la distance hydraulique par  
de l'eau déversée par le BVE;

\* une phase de détermination (22) du débit, comprenant  
périodiquement les étapes suivantes:

- estimation (29) d'une quantité d'eau de pluie élé-  
mentaire déversée par chacun des BVE;

- calcul (210) du débit à l'exutoire, à partir des quantités  
d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensi-  
blement égal à la durée de parcours associée au BVE cor-  
respondant.



FR 2 732 477 - A1



**Procédé et système de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, procédé de détermination de données correspondant.**

Le domaine de l'invention est celui des techniques de modélisation de la transformation de la pluie en débit, c'est-à-dire des techniques permettant d'obtenir, à partir de données de pluie, des débits les plus proches possibles de ceux réellement ou potentiellement observables sur un bassin versant.

L'invention se rapporte à une telle technique de modélisation (ou modèle) pluie-débit et concerne plus précisément un procédé de détermination d'un débit eau à l'exutoire d'un bassin versant.

Par bassin versant (ou bassin hydrographique), on entend ici, conformément au glossaire international d'hydrologie, l'ensemble d'une région ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface et délimitée par une limite géographique dite ligne de partage des eaux. L'exutoire draine donc toute l'eau en mouvement à la surface de l'entité géomorphologique que constitue le bassin versant.

D'une façon générale, un modèle de transformation de la pluie en débit, en permettant la simulation, la prédétermination ou encore la prévision des débits, facilite la gestion de la ressource en eau ainsi que l'évaluation de l'impact des activités humaines.

La modélisation de la transformation de la pluie en débit a de nombreuses applications, telles que par exemple :

- l'extension des séries de données de débit : on étend une période trop courte de relevés hydrométriques grâce à une série plus longue de données pluviométriques. Ceci peut servir à connaître l'historique du comportement d'un bassin et du cours d'eau qui lui est associé, et donc d'apprécier l'impact d'un aménagement ou de l'évolution de ce bassin ;
- la prédétermination des crues. Ceci sert par exemple à l'évaluation du risque lié à l'installation d'une activité dans le lit majeur d'une rivière. Afin de dimensionner les moyens d'évacuation d'un ouvrage dont la destruction pourrait entraîner des pertes majeures en vies humaines ou en matériels, on peut aussi chercher à prédéterminer la crue maximale probable, qui est celle qui résulterait de la combinaison la plus défavorable

de conditions météorologiques et hydrologiques raisonnablement possibles dans la région ;

- la prévision des crues : on cherche à prévenir la population en cas d'épisode de pluie laissant présager une crue à venir. En effet, l'association d'un modèle de prévision des crues à un système d'alerte peut constituer un système non structural tout à fait intéressant de protection contre les crues, permettant une limitation des dégâts par l'évacuation des zones menacées par les crues, ou une utilisation optimale des réservoirs.

10 On connaît, dans l'état de la technique, différents types de modèles de transformation de la pluie en débit. On distingue généralement deux approches distinctes :

- l'une, dite empirique, propose un schéma sans lien direct avec la réalité et a pour unique but d'aboutir à des sorties les plus proches possibles des débits d'un bassin versant réel ;
- l'autre, dite déterministe, tente de schématiser le fonctionnement complexe de l'ensemble d'un bassin versant par l'intermédiaire d'opérations mathématiques faisant appel à des paramètres plus ou moins simples et pouvant intégrer plusieurs étapes des processus hydrodynamiques sur le bassin versant.

20 L'approche la plus utilisée et qui est également celle de l'invention, est l'approche déterministe. Selon cette approche déterministe, lors d'un épisode pluvieux, il y a des pertes d'eau par interception, infiltration et évapotranspiration, le reste étant transformé en débit par écoulement de surface (ruissellement) et de subsurface (écoulement hypodermique).

25 Dans un modèle déterministe, on distingue donc :

- la pluviométrie, qui décrit les précipitations et constitue la variable d'entrée (ou explicative) majeure ;
- la lame éculée, qui est la somme de la lame ruisselée directe (écoulement de surface) et de la lame ruisselée retardée (écoulement hypodermique) ;

30 cette lame éculée conduisant directement au débit et constituant l'unique

variable de sortie dite expliquée ;

- l'évapotranspiration, l'interception et l'infiltration, qui sont considérées comme des pertes.

Par exemple, en ce qui concerne les orages occasionnant des crues catastrophiques en région méditerranéenne ou en climat de mousson, il apparaît que les pertes sont faibles, si bien que le coefficient de ruissellement (rapport entre la lame ruisselée et la pluviométrie) est fort. Cela signifie que, dans ce cas, la pluie se retrouve, pour la majeure partie, transformée en débit, d'où le danger en aval du réseau hydrographique intégrant les forts débits d'un bassin soumis à un orage.

On explique généralement le ruissellement de la façon suivante : lorsque l'eau des précipitations tombe sur une zone où les taux d'infiltration et d'évapotranspiration sont inférieurs ou égaux à l'intensité de l'averse, le phénomène de ruissellement commence sur toute cette zone.

La forme typique de l'hydrogramme de crue peut être expliquée par la théorie du ruissellement de HORTON selon laquelle, pendant une pluie, l'eau s'infiltre tant que le sol n'a pas atteint sa capacité limite d'absorption. Au fur et à mesure que l'eau s'infiltre, le sol se sature et la pénétration de l'eau dans le sol décroît. L'eau excédentaire s'accumule puis ruisselle le long de la pente. Cette eau de ruissellement participe en général à l'augmentation du débit du cours d'eau drainant, sauf lorsqu'elle remplit des dépressions locales.

Une autre théorie, basée sur un concept de zone contributive, diverge de la théorie de HORTON en affirmant que les forts débits sont, en fait, dus à un écoulement rapide dans et sur le sol d'une partie seulement (et non pas de l'ensemble) du bassin versant.

Ce concept de zone contributive ne s'applique toutefois pas dans le cas d'une pluie d'orage exceptionnelle où est valable le modèle "hortonien". Le modèle "hortonien" reste donc valable notamment pour les crues catastrophiques en zone méditerranéenne.

Les deux principaux opérateurs mathématiques d'un modèle déterministe de transformation de la pluie en débit sont :

- le fonction de production (ou fonction de rendement) ; et
- la fonction de transfert.

La fonction de production permet la transformation de la précipitation (ou pluie brute) en pluie nette pour l'écoulement. Elle tient compte des pertes de l'averse (c'est-à-dire des processus d'interception, de stockage, d'évaporation et d'infiltration).

La fonction de transfert permet la transformation de la pluie nette en débit à l'exutoire du bassin versant. En d'autres termes, la fonction de transfert exprime le passage d'un hyéogramme (expression d'une pluie en fonction du temps) à l'hydrogramme résultant (expression d'un débit en fonction du temps).

Dans le modèle le plus connu de transformation de la pluie en débit, la fonction de transfert utilisée est l'Hydrogramme Unitaire Instantané de NASH". La méthode de l'hydrogramme unitaire, qui s'applique à la partie de ruissellement pur de l'écoulement, est basée sur les trois principes fondamentaux suivants :

- on appelle averse unitaire toute averse homogène dans le temps et dans l'espace, d'une intensité suffisante pour donner lieu à du ruissellement sur la totalité du bassin , et de durée  $T$  inférieure à une valeur seuil  $T_0$ .  $T_0$  est la valeur seuil de l'averse au-dessous de laquelle le temps de montée  $t_m$  de l'hydrogramme est constant et égal au temps de montée propre  $t_0$  du bassin (caractéristique purement hydraulique) et au-dessus de laquelle le temps de montée  $t_m$  est croissant avec  $T$  ;
- propriété d'affinité : soit une averse unitaire occasionnant un volume de ruissellement  $V_1$  ; si une autre averse unitaire donne sur le même bassin un volume de ruissellement  $V_2$ , alors l'hydrogramme correspondant  $u_2(t)$  se déduit du premier  $u_1(t)$  par une affinité  $V_2/V_1$  ;
- propriété d'additivité : on peut décomposer une averse complexe en averses unitaires et en déduire l'hydrogramme résultant comme étant la somme par convolution des hydrogrammes unitaires correspondant aux averses unitaires.

Afin d'établir une formule permettant d'exprimer l'Hydrogramme Unitaire Instantané de NASH  $u(t)$ , une analogie est faite entre le système que constitue le bassin versant et un système de  $m$  réservoirs linéaires en série. On considère alors que le flux entrant dans le premier réservoir est la pluie, et que le flux entrant dans les autres

réservoirs est le flux unitaire sortant d'un réservoir linéaire de formule :  $1/k \cdot e^{-t/k}$

D'où la formule de l'Hydrogramme Unitaire Instantané de NASH :

5

$$u(t) = \frac{1}{k(m-1)!} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{m-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

où : -  $k$  est le coefficient de stockage de chaque réservoir, paramètre propre - mais de façon non explicite - au bassin versant ; et  
-  $m$  est le nombre de réservoirs.

10

Lors d'un épisode pluvieux, l'hydrogramme réel  $Q(t)$  est obtenu par le produit de convolution suivant :

$$Q(t) = \int_0^t R(\tau) \cdot u(t-\tau) \cdot d\tau$$

15

où  $R(t)$  est l'intensité de la pluie contribuant à l'écoulement direct, c'est-à-dire la pluie efficace.

Actuellement, la méthode de l'Hydrogramme Unitaire Instantané de NASH est la plus utilisée et on estime que c'est la plus efficace, notamment dans le cas des études de crues sur de petits bassins (d'une surface inférieure à  $100 \text{ km}^2$ ).

20

Toutefois, cette méthode connue présente l'inconvénient majeur de nécessiter un calage des paramètres  $m$  et  $k$  à partir d'hydrogrammes de crue ayant déjà réellement eu lieu et des hyéogrammes correspondants.

25

En effet, le coefficient de stockage  $k$  et le nombre de réservoirs  $m$ , qui sont des paramètres compréhensibles au sein de l'analogie avec le système des réservoirs, ne s'expriment pas en fonction de paramètres physiques du bassin versant.

La nécessité d'un calage par analyse d'une crue ayant déjà réellement eu lieu empêche la généralisation de cette méthode et en limite donc forcément l'utilisation.

L'invention a notamment pour objectif de pallier cet inconvénient majeur de l'état de la technique.

30

Plus précisément, l'un des objectifs de la présente invention est de fournir un

procédé de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, ce procédé ne nécessitant aucun calage de quelque paramètre que ce soit.

En d'autres termes, l'objectif de l'invention est de fournir un procédé permettant la détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, même si l'on ne dispose d'aucune information (hydrogrammes, hyéogrammes) concernant une crue ayant déjà réellement eu lieu sur ce bassin versant.

L'invention a également pour objectif de fournir un tel procédé qui soit simple à mettre en oeuvre et qui s'applique à un bassin versant quelconque, quelles que soient les caractéristiques de l'épisode pluvieux considéré.

Ces différents objectifs, ainsi que d'autres qui apparaîtront par la suite, sont atteints selon l'invention à l'aide d'un procédé de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, ce procédé comprenant :

- \* une phase d'initialisation, comprenant les étapes suivantes :
  - découpage dudit bassin versant en un ensemble de bassins versants élémentaires ;
  - association à chacun desdits bassins versants élémentaires d'une première donnée représentative de la distance hydraulique entre ledit bassin versant élémentaire et ledit exutoire, et d'une seconde donnée représentative de la durée de parcours de ladite distance hydraulique par de l'eau déversée par ledit bassin versant élémentaire ;
- \* une phase de détermination dudit débit, comprenant périodiquement les étapes suivantes :
  - estimation d'une quantité d'eau de pluie élémentaire déversée par chacun desdits bassins versants élémentaires ;
  - calcul du débit à l'exutoire, à partir desdites quantités d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensiblement égal à ladite durée de parcours associée au bassin versant élémentaire correspondant.

Le principe de l'invention consiste donc à relier l'agencement spatial des cours

d'eau au mécanisme qui transfère l'eau de pluie vers l'exutoire. Le bassin versant est caractérisé en tant que système de collecte.

Un bassin versant élémentaire est défini ici comme une portion du bassin versant telle que toute l'eau de pluie qui tombe sur cette portion se déverse dans un bief élémentaire, c'est-à-dire dans une fraction du réseau hydrographique comprise entre une extrémité (autre que l'exutoire) et une confluence.

Le procédé de l'invention ne nécessite aucun calage de paramètre puisqu'il s'appuie uniquement sur la pluviométrie et les paramètres du bassin versant.

Avantageusement, ladite durée de parcours affectée à chaque quantité d'eau élémentaire tient compte d'une vitesse d'écoulement moyenne sur la distance hydraulique parcourue par ladite quantité d'eau élémentaire. Selon une variante avantageuse, la vitesse d'écoulement est variable.

L'écoulement est la somme du ruissellement (ou ruissellement direct), de l'écoulement hypodermique (ou ruissellement retardé) et de l'écoulement de base. Il est à noter qu'on utilise parfois le terme ruissellement au lieu du terme écoulement, notamment dans le cas d'une fonction de production du type "hortonien" (fort ruissellement qui participe à l'augmentation du débit et peut générer une crue).

Dans un mode de réalisation préférentiel de l'invention, ladite phase d'initialisation comprend également une étape de détermination d'une densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours de la distance hydraulique. Ainsi, le bassin versant est décrit par cette densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de leur durée de parcours. En d'autres termes, cette densité décrit mathématiquement l'agencement spatial du réseau hydrographique.

Avantageusement, ladite phase d'initialisation comprend également :

- une étape de détermination de l'ordre du bassin versant, et
- une étape de détermination de la durée de parcours moyenne,
- ladite densité de répartition étant fonction dudit ordre du bassin versant et/ou de ladite durée de parcours moyenne.

Préférentiellement, ladite densité de répartition s'écrit sous la forme :

$$\rho(\tau) = \left(\frac{n}{2\tau}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{(\frac{n}{2}-1)!} \cdot \tau^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n\tau}{2}}$$

où :

- $n$  est l'ordre du bassin versant ;
- $\tau$  est la durée de parcours de la distance hydraulique ;
- $\bar{\tau}$  est la durée de parcours moyenne ;
- $!$  symbolise la fonction gamma.

Ainsi, la densité de répartition peut être établie à partir de la seule connaissance de  $n$  et  $\bar{\tau}$ , qui sont des paramètres morphométriques du bassin versant.

Avantageusement, ladite durée de parcours moyenne est fonction d'une distance hydraulique moyenne, ladite distance hydraulique moyenne étant déterminée au moyen d'une technique consistant à traiter une image représentant un réseau hydrographique correspondant audit bassin versant, puis, par voie informatique, à mesurer sur l'image traitée toutes lesdites distances hydrauliques associées à l'ensemble des bassins versants élémentaires, et à moyenner lesdites distances hydrauliques mesurées.

Le passage de la distance hydraulique moyenne à la durée de parcours moyenne se fait par exemple en considérant une vitesse d'écoulement moyenne.

Préférentiellement, ledit calcul du débit à l'exutoire consiste à effectuer un produit de convolution temporelle entre :

- d'une part, une première fonction représentative de la quantité d'eau élémentaire déversée par chaque bassin versant élémentaire en fonction du temps, et
- d'autre part, une seconde fonction représentative de ladite densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours.

La première fonction est donc représentative de la pluie efficace, puisque la quantité d'eau élémentaire déversée par chaque bassin versant élémentaire correspond à la partie de la pluie brute reçue par ce bassin versant élémentaire qui s'écoule effectivement pour contribuer à l'augmentation du débit.

La seconde fonction, qui permet la transformation de la pluie efficace en débit à

l'exutoire, est la fonction de transfert.

5

Ainsi, l'invention permet de dire que l'Hydrogramme Unitaire Instantané de NASH traduit en fait la densité de répartition des bassins versants élémentaire en fonction de la durée de parcours. L'invention permet d'expliciter les paramètres  $n$  (nombre de réservoirs) et  $k$  (coefficient de stockage) de NASH. En effet, par comparaison des formules de la densité de répartition et de l'Hydrogramme Unitaire Instantané, on en déduit que :

$$* k = 2 \cdot \tau / n ;$$

$$* m = n / 2.$$

10

La différence fondamentale entre NASH et l'invention réside dans la façon d'obtenir la fonction de transfert.

15

En effet, dans les deux cas, la fonction de transfert dépend de deux paramètres ( $n$  et  $k$  pour NASH,  $n$  et  $\tau$  pour l'invention). Mais NASH ne sait pas déterminer les deux paramètres  $n$  et  $k$  dont il a besoin s'il ne dispose pas de données (hyéogrammes et hydrogrammes) établis lors d'une crue (ou plus généralement d'un épisode pluvieux) ayant déjà eu lieu sur le bassin versant étudié. Au contraire, l'invention permet de déterminer les deux paramètres  $n$  et  $\tau$  nécessaires par simple analyse morphométrique du bassin versant puisque  $n$  et  $\tau$  sont des paramètres physiques propre au bassin versant étudié.

20

Préférentiellement, ledit produit de convolution s'écrit sous la forme :

$$Q(t) = \int_0^t \rho(\tau) \cdot \bar{P}(t-\tau) \cdot S \cdot d\tau$$

25

où : -  $Q(t)$  est le débit à l'exutoire à un instant  $t$  par rapport à un instant d'origine ( $t = 0$ ) d'un épisode pluvieux ;  
 -  $\rho(\tau)$  est le nombre de bassins versants élémentaires affectés d'une durée de parcours  $\tau$  pouvant varier entre 0 et  $t$  ;  
 -  $P(t') = P(t - \tau)$  est une quantité d'eau élémentaire moyenne déversée par chaque bassin versant élémentaire à un instant donné  $t'$ ,  $t'$  correspondant à l'instant  $t$  diminué de la durée de parcours  $\tau$  et pouvant varier entre  $t' = 0$

30

(lorsque  $\tau = t$ ) et  $t' = t$  (lorsque  $\tau = 0$ ) ;

-  $S$  est la surface du bassin versant.

$P(t')$  est donc la pluie efficace moyenne de chaque bassin versant élémentaire à l'instant  $t'$ .

5 Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention, ladite phase de détermination comprend de plus une étape de correction du débit calculé, en fonction d'au moins un paramètre appartenant au groupe comprenant :

- une lame d'eau préliminaire qui sature le sol du bassin versant ;
- un effet de laminage lors de l'écoulement de l'eau ;
- 10 une hétérogénéité géomorphologique du bassin versant ;
- au moins une valeur de débit calculée et/ou au moins une valeur de débit mesurée lors d'un épisode pluvieux antérieur ;
- au moins une information externe concernant notamment l'époque de l'année et/ou les conditions climatiques.

15 Préférentiellement, ladite étape d'estimation d'une quantité d'eau élémentaire déversée met en oeuvre des moyens de mesure de données pluviométriques appartenant au groupe comprenant :

- des pluviographes ;
- des dispositifs de prise d'images (notamment des radars et/ou des satellites) ;
- 20 des dispositifs d'analyse d'images.

Avantageusement, un coefficient d'écoulement est associé à chacun des bassins versants élémentaires, et, pour chaque bassin versant élémentaire, la quantité d'eau de pluie élémentaire déversée est estimée à partir d'une quantité d'eau de pluie élémentaire reçue lors d'un épisode pluvieux, par pondération par le coefficient d'écoulement dudit bassin versant élémentaire. En d'autres termes, on estime la pluie efficace à partir de la pluie brute, grâce au coefficient d'écoulement de chaque bassin versant élémentaire.

25 On peut prévoir que le coefficient d'écoulement soit sensiblement homogène sur l'ensemble du bassin versant, ou bien par sous-bassins.

30 Avantageusement, la quantité d'eau de pluie élémentaire reçue lors d'un épisode

pluvieux est sensiblement identique pour tous les bassins versants élémentaires du bassin versant.

5 Selon une variante, le bassin versant n'est pas homogène quant à la pluie reçue, mais est divisé en au moins deux groupes de bassins versants élémentaires, les bassins versants élémentaires d'un même groupe recevant une quantité d'eau de pluie élémentaire sensiblement identique lors d'un épisode pluvieux.

10 De façon avantageuse, on peut même envisager dans ce cas que la composition desdits groupes soit variable dans le temps, de façon à prendre en compte le déplacement, par rapport au bassin versant, d'une source d'eau atmosphérique libérant lesdites quantités d'eau de pluie élémentaires reçues.

Dans un mode de réalisation préférentiel de l'invention, la phase de détermination du débit comprend également ;

- une étape de comparaison dudit débit calculé avec au moins un débit seuil prédéterminé ;
- une étape de déclenchement d'une alerte si le débit calculé est supérieur audit débit seuil prédéterminé.

15 Ce mode de réalisation s'applique notamment à la prévision des crues.

L'invention concerne aussi un procédé de détermination de données destinées à être utilisées dans un calcul d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- découpage dudit bassin versant en un ensemble de bassins versants élémentaires ;
- association à chacun desdits bassins versants élémentaires d'une première donnée représentative de la distance hydraulique entre ledit bassin versant élémentaire et ledit exutoire, et d'une seconde donnée représentative de la durée de parcours de ladite distance hydraulique par de l'eau déversée par ledit bassin versant élémentaire.

20 Avantageusement, ledit procédé comprend également une étape de détermination d'une densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours de la distance hydraulique.

5

10

15

20

25

30

Enfin, l'invention concerne également un système de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, ledit système recevant des données générées par la mise en oeuvre d'un procédé tel que défini précédemment, ledit système comprenant :

5

- au moins un capteur permettant d'estimer une quantité d'eau élémentaire déversée par chacun desdits bassins versants élémentaires ;
- des moyens de calcul du débit à l'exutoire, à partir desdites quantités d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensiblement égal à ladite durée de parcours associée au bassin versant élémentaire correspondant.

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention, donné à titre d'exemple indicatif et non limitatif, et des dessins annexés, dans lesquels :

15

- la figure 1 est un schéma explicatif général rappelant le bilan des flux d'eau lors d'une pluie ;
- la figure 2 schématise la succession des différentes étapes d'un mode de réalisation particulier du procédé de détermination d'un débit d'eau selon l'invention ;
- la figure 3 présente de façon schématique un exemple de bassin versant ;
- la figure 4 présente un exemple d'indexation des biefs du bassin versant de la figure 3 ;
- la figure 5 présente un exemple de réseau hydrographique d'un bassin versant ;
- la figure 6 présente deux courbes, expérimentale et théorique, de répartition, pour le réseau hydrographique de la figure 5, des bassins versants élémentaires en fonction de leurs distances hydrauliques ;

20

- la figure 7 présente un exemple de hyéogramme, correspondant à une crue connue ;
- la figure 8 présente un hydrogramme théorique correspondant au hyéogramme de la figure 7, et obtenu par le procédé de l'invention ; et
- la figure 9 présente un hydrogramme réel correspondant au hyéogramme de la figure 7, et obtenu par une série de mesures réelles du débit lors de la

25

30

crue.

L'invention concerne donc un procédé de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant. Ce procédé doit permettre l'obtention, à partir de données de pluie, de débits les plus proches possibles de ceux existant réellement.

5 La figure 1 illustre le bilan des flux d'eau lors d'une pluie. D'une façon générale et connue, dans un modèle de transformation de la pluie en débit, on distingue une variable d'entrée, une variable de sortie et des pertes.

10 Les précipitations 1 constituent la variable d'entrée. L'évapotranspiration 2, l'interception 3 et l'infiltration 4 sont considérées comme des pertes. L'écoulement 5, qui conduit directement au débit, constitue la variable de sortie.

Cet écoulement 5 vers un cours d'eau 8 est la somme du ruissellement 6, de l'écoulement de base et de l'écoulement hypodermique 7.

15 L'invention s'applique notamment aux événements pluvieux de forte intensité (orages), pour lesquels les pertes 2 à 4 sont faibles, et le ruissellement 6 est très fort et constitue l'essentiel de l'écoulement 5. La pluie 1 se retrouve alors presque entièrement transformée en ruissellement 5, et vient augmenter le débit du cours d'eau 8, ceci pouvant occasionner des crues catastrophiques.

20 Il est clair cependant que le procédé de l'invention n'est pas limité à de tels cas de crues où l'écoulement est un ruissellement. En effet, il peut également être appliqué aux écoulements autres que le ruissellement.

La figure 2 schématisse la succession des différentes étapes d'un mode de réalisation particulier du procédé de l'invention. Ce procédé comprend une première phase d'initialisation 21 et une seconde phase de détermination d'un débit 22.

25 La première phase d'initialisation 21 comprend notamment les étapes suivantes :

- découpage 23 du bassin versant en un ensemble de bassins versants élémentaires (ou BVE) ;
- association 24 à chacun des bassins versants élémentaires d'une première donnée représentative de la distance hydraulique  $L$  entre le bassin versant élémentaire et l'exutoire, et d'une seconde donnée représentative de la durée de parcours  $\tau$  de la distance hydraulique  $L$  par de l'eau déversée par

le bassin versant élémentaire (c'est-à-dire par de l'eau qui s'écoule à partir du bassin versant élémentaire).

On explicite maintenant les termes bassin versant, bassin versant élémentaire, distance hydraulique et durée de parcours, en relation avec la figure 3 qui présente un exemple de bassin versant 31.

Ce bassin versant (ou bassin hydrographique) 31 correspond à une région ayant un exutoire commun 32 par ses écoulements de surface. Il est délimité par une ligne de partage des eaux 33. Cette frontière 33 correspond à des lignes de crête lorsqu'on se place dans des conditions où les nappes souterraines ne jouent que peu de rôle dans le fonctionnement hydrologique de la région. Le point exutoire 32 draine toute l'eau en mouvement à la surface de l'entité géomorphologique de bassin. Ces écoulements de surfaces correspondent à une eau qui coule dans le sens du gradient local d'altitude, c'est-à-dire la pente, selon la loi de gravité.

Tous les talwegs 34, lignes qui suivent les parties les plus basses d'une vallée, tant au niveau du micro que du macro-relief, vont être des lieux de convergence des écoulements de surface ou subsurface, et leur agencement constitue le réseau de drainage ou réseau hydrographique associé au bassin versant 31. Le terme drainage traduit le processus physique de convergence des eaux, alors que le terme hydrographique traduit un écoulement tellement remarquable qu'il mérite d'être noté sur un support géographique.

Par extension de langage, un réseau hydrographique correspond à l'ensemble des rivières et autres cours d'eau permanents ou temporaires, ainsi que des lacs et des réservoirs, dans une région donnée. Ces cours d'eau 34, dits affluents, se relient en des points appelés confluences 35.

On appelle bief une fraction du réseau hydrographique comprise entre deux confluences et une extrémité, ou encore entre deux extrémités. Par extrémités, on entend les extrémités des traits du réseau hydrographique, qui correspondent, à la précision du dessin près, aux extrémités des talwegs. Par définition, le point exutoire 32 est une extrémité.

Un bief est dit élémentaire s'il est délimité par une extrémité autre que l'exutoire

32. Tout bief élémentaire correspond à un bassin versant élémentaire. Ainsi, un bassin versant élémentaire 36 est défini par l'intermédiaire d'un bief élémentaire associé 37 et correspond à une partie du bassin versant 31 telle que toute la pluie tombant sur cette partie et qui donne lieu à un écoulement (on parle alors de pluie efficace) se retrouve dans le bief élémentaire 37 associé.

On fait ici l'hypothèse que le bassin versant 31 est une juxtaposition géographiquement sensiblement parfaite de bassins versants élémentaires 36.

La distance hydraulique  $L$  associée à un bassin versant élémentaire est la distance que doit parcourir une goutte s'écoulant depuis ce bassin versant élémentaire pour parvenir, en suivant le réseau hydrographique, jusqu'à l'exutoire 32.

La durée de parcours  $\tau$  associée à un bassin versant élémentaire est le temps que met une goutte d'eau pour parcourir la distance hydraulique  $L$  associée à ce même bassin versant élémentaire.

Cette durée de parcours  $\tau$  peut être déduite de la distance hydraulique correspondante  $L$  si l'on connaît la vitesse d'écoulement de l'eau 25 sur cette distance hydraulique  $L$

Pour cela, on peut par exemple considérer une vitesse d'écoulement moyenne, fixée en fonction d'un ou plusieurs paramètres tels que notamment :

- la pente, l'occupation ou encore la nature d'un sol situé sur une face inclinée du bassin versant, et sur lequel passe au moins une portion d'au moins certaines des distances hydrauliques ;
- la pente ou la rugosité d'un lit (ou trait) du réseau hydrographique associé au bassin versant, et sur lequel passe au moins une portion d'au moins certaines des distances hydrauliques.

Selon une variante, on considère une vitesse d'écoulement variable, fonction par exemple :

- d'une ou plusieurs conditions géographiques, et /ou
- d'un ou plusieurs phénomènes hydrauliques (pente globale, pente locale, conditions d'écoulement locales (rugosité, état des rives, obstacles et ouvrages hydrauliques, plans d'eau, champs d'épandage, chutes

d'eau,...)).

Dans le mode de réalisation présenté sur la figure 2, la phase d'initialisation 21 comprend également les étapes suivantes :

- détermination 26 de l'ordre  $n$  du bassin versant 31 ;
- détermination 27 de la durée de parcours moyenne  $\tau$  ; et
- détermination 28 d'une densité  $\rho(\tau)$  de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours  $\tau$  de la distance hydraulique  $L$ .

L'étape de détermination 26 de l'ordre  $n$  du bassin versant consiste par exemple à indexer les biefs du bassin versant, puis à prendre comme ordre  $n$  du bassin versant l'indice de bief le plus élevé.

La figure 4 présente un exemple d'indexation des biefs du bassin versant 31 de la figure 3. Cette indexation, dite de STRAHLER ou SCHUMM, affecte à chaque bief un indice selon les règles suivantes :

- tout bief élémentaire est d'indice 1 ;
- tout bief non élémentaire est d'ordre :
  - \*  $i$ , si ses affluents sont d'ordre  $i$  et  $j$ , avec  $j < i$ ,
  - \*  $i + 1$ , si ses affluents sont tous les deux d'ordre  $i$ .

Sur la figure 4, on a indiqué près de chaque bief l'indice qui lui correspond. Dans cet exemple, les indices vont de 1 à 3. Par conséquent, l'ordre du bassin versant 31 est  $n = 3$ .

L'étape de détermination 27 de la durée de parcours moyenne  $\tau$  consiste par exemple à déterminer une distance hydraulique moyenne  $L$ , puis à en déduire la durée de parcours moyenne en considérant une vitesse d'écoulement moyenne.

Le réseau hydrographique d'un bassin versant, dont un exemple est présenté sur la figure 5, est par exemple obtenu par dessin à la main à partir des cartes IGN au 1/25 000. Pour avoir un nombre de bassins versants élémentaires suffisant (et donc un nombre de biefs élémentaires suffisant), et approcher au mieux la réalité physique du bassin, on peut reprendre les figurés bleu continu et bleu pointillé de ces cartes (représentant respectivement les cours d'eau permanents et temporaires), et les prolonger à l'amont

lorsque les courbes de niveau présentent une inflexion suffisante pour trahir la présence d'un talweg.

Une automatisation du tracé du réseau hydrographique avec la finesse requise peut être envisagée, notamment à partir des modèles numériques de terrain ou de la stéréophotogrammétrie, si ceux-ci présentent la sensibilité nécessaire. De plus, les photos aériennes devraient permettre de mieux appréhender le réseau artificiel constitué du drainage de surface, des fossés, des zones imperméabilisées, ...

Les étapes 26 et 27 de détermination de l'ordre  $n$  du bassin versant et de la durée de parcours  $\tau$  peuvent être réalisées par voie informatique, après que l'on a numérisé l'image du réseau hydrographique.

Plus précisément, après numérisation de l'image, le squelette du réseau hydrographique est assimilé à une structure hiérarchisée d'arbre binaire, et peut donc faire l'objet d'un traitement permettant :

- le calcul des distances hydrauliques  $L$ , d'où la distance hydraulique moyenne  $\bar{L}$ , et la durée de parcours moyenne  $\bar{\tau}$  ;
- l'affectation d'indices (par exemple de STRAHLER), d'où l'ordre  $n$  du bassin versant.

Les déposants ont démontré, en s'appuyant sur un formalisme mathématique propre à la physique statistique, que la densité  $\rho(\tau)$  de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours  $\tau$  peut s'écrire sous la forme :

$$\rho(\tau) = \left(\frac{n}{2\tau}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{(\frac{n}{2}-1)!} \cdot \tau^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n\tau}{2}}$$

où :

- $n$  est l'ordre du bassin versant ;
- $\tau$  est la durée de parcours de la distance hydraulique ;
- $\bar{\tau}$  est la durée de parcours moyenne ;
- $!$  symbolise la fonction gamma.

Par conséquent, la densité  $\rho(\tau)$  est connue dès que les deux paramètres  $n$  et  $\tau$  sont connus.

Il est à noter que selon l'invention, cette densité constitue la fonction de transfert pluie-débit, et, contrairement à toutes les fonctions de transfert connues du déposant, elle ne nécessite aucun calage préalable et peut être déterminée simplement à partir de paramètres physiques propres au bassin versant, à savoir l'ordre  $n$  du bassin versant et la durée de parcours moyenne  $\tau$  associée au bassin versant.

Selon une variante, la densité  $\rho(\tau)$  est obtenue par extrapolation de la courbe expérimentale et discontinue dont on dispose après avoir comptabilisé par classes les durées de parcours  $\tau$  de l'ensemble des bassins versants élémentaires.

Ainsi, la densité  $\rho(\tau)$  peut être :

- soit "théorique", si on la détermine à l'aide de la formule précitée, après avoir préalablement déterminé les paramètres  $n$  et  $\tau$  ;
- soit "expérimentale", si on la détermine par extrapolation de la courbe expérimentale des durées de parcours.

Il est clair que l'on peut également déterminer une densité  $\rho(L)$  de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la distance hydraulique  $L$ , puis en déduire la densité  $\rho(\tau)$ , par exemple en considérant une vitesse d'écoulement moyenne.

Ainsi, la figure 6 présente deux courbes, expérimentale 61 et théorique 62, de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de leurs distances hydrauliques  $L$ . On exprime donc un nombre  $N_{BVE}$  de bassins versants élémentaires en fonction d'une distance  $L$  en km. Les densités  $\rho(L)$  correspondantes, expérimentale et théorique, se déduisent de ces courbes 61, 62 par division par le nombre total  $N$  de bassins versants élémentaires.

La seconde phase de détermination d'un débit 22 comprend périodiquement notamment les étapes suivantes :

- estimation 29 d'une quantité d'eau de pluie élémentaire déversée par chacun des bassins versants élémentaires ;
- calcul 210 du débit à l'exutoire, à partir des quantités d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensiblement égal à la durée de parcours  $\tau$  associé au bassin versant élémentaire correspondant.

L'étape 29 d'estimation des quantités d'eau déversées consiste à déterminer la

pluie efficace à partir de la pluie brute reçue par le bassin versant. Par pluie efficace, on entend la pluie qui se retrouve dans l'écoulement.

La pluie brute peut être estimée par la mise en oeuvre de moyens de mesure de données pluviométriques 211, tels que des pluviographes. On peut améliorer la description de l'évènement pluvieux en optimisant l'implantation des moyens de mesure, par exemple en fonction de la superficie, la forme, le relief ou encore l'orientation, par rapport au vent dominant, du bassin versant. On peut également utiliser des dispositifs de prise d'images (notamment des radars et des satellites) et des dispositifs d'analyse d'image. Des radars au sol permettent par exemple l'étude de la répartition spatiale de la pluie.

Un pas de temps fin, entre une minute et une heure, de la mesure pluviométrique permet de prendre en compte efficacement les fortes intensités de précipitation. Ceci est très important puisque ce sont les pics d'intensité de pluie qui génèrent les pics de crue.

On peut considérer un bassin versant homogène du point de vue de la pluie reçue (chaque bassin versant élémentaire est censé recevoir une même quantité d'eau élémentaire). Mais on peut également, selon une variante, considérer des sous-bassins homogènes du point de vue de la pluie reçue. Dans ce cas, chaque sous-bassin correspond à un groupe de bassins versants élémentaires censés recevoir une même quantité d'eau élémentaire. On peut même envisager que la composition de ces groupes soit variable dans le temps, de façon à prendre en compte le déplacement de l'orage par rapport au bassin versant.

Afin d'estimer la pluie efficace à partir de la pluie brute, on associe à chaque bassin versant élémentaire un coefficient d'écoulement 212. On estime que la quantité d'eau élémentaire déversée (quantité d'eau de pluie nette) est égale à la quantité d'eau élémentaire reçue (quantité d'eau de pluie brute) pondérée par le coefficient d'écoulement du bassin versant élémentaire correspondant.

On peut considérer un bassin versant homogène quant au coefficient d'écoulement (avec un coefficient d'écoulement moyen) ou bien une homogénéité par bassins.

Le coefficient d'écoulement peut dépendre de l'antécédent météorologique (état hydrique du bassin versant au début de l'épisode pluvieux), du relief du bassin versant,

de la nature et de l'occupation (couverture) du sol du bassin versant, etc.

L'étape 210 de calcul du débit à l'exutoire consiste par exemple à effectuer le produit de convolution suivant :

$$5 \quad Q(t) = \int_0^t \rho(\tau) \bar{P}(t-\tau) \cdot S \cdot d\tau$$

où : -  $Q(t)$  est le débit à l'exutoire à un instant  $t$  par rapport à un instant d'origine ( $t = 0$ ) de l'épisode pluvieux ;

-  $\rho(\tau)$  est le nombre de bassins versants élémentaires affectés d'une durée de parcours  $\tau$  pouvant varier entre 0 et  $t$  ;

10 -  $\bar{P}(t') = P(t - \tau)$  est une quantité d'eau élémentaire moyenne déversée par chaque bassin versant élémentaire à un instant donné  $t'$ ,  $t'$  correspondant à l'instant  $t$  diminué de la durée de parcours  $\tau$  et pouvant varier entre  $t' = 0$  (lorsque  $\tau = t$ ) et  $t' = t$  (lorsque  $\tau = 0$ ) ;

15 -  $S$  est la surface du bassin versant.

Les courbes de représentation des fonctions  $Q(t)$  et  $P(t')$  sont appelées hydrogramme et hyéogramme respectivement.

La figure 7 présente un exemple de hyéogramme  $P(t')$  d'un épisode pluvieux réel ayant engendré une crue sur le bassin versant de la Malière (France) le 13 septembre 20 1968.

La figure 8 présente l'hydrogramme, dit théorique,  $Q_T(t)$  obtenu par le procédé de l'invention et correspondant au hyéogramme de la figure 7. La figure 9 présente l'hydrogramme, dit réel,  $Q_R(t)$  obtenu par une série de mesures réelles du débit lors de la crue et correspondant au hyéogramme de la figure 7.

25 L'hydrogramme théorique donne une bonne estimation de l'hydrogramme réel. On note simplement un pic de crue 81 légèrement surestimé ( $83,05 \text{ m}^3/\text{s}$  au lieu de  $78,25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et en avance de 5 minutes, ainsi qu'un premier pic 82 en début de pluie qui n'existe pas sur l'hydrogramme réel.

30 On peut faire suivre l'étape 210 de calcul du débit d'une étape 213 de correction du débit calculé. Lors de cette étape de correction 213, on peut prendre en compte au

moins un paramètre 214 appartenant au groupe comprenant :

- une lame d'eau préliminaire qui sature le sol du bassin versant ;
- un effet de laminage lors de l'écoulement de l'eau ;
- une hétérogénéité géomorphologique du bassin versant ;
- au moins une valeur de débit calculée et/ou au moins une valeur de débit mesurée lors d'un épisode pluvieux antérieur ;
- au moins une information externe concernant notamment l'époque de l'année et/ou les conditions climatiques.

5

Enfin, si le procédé est utilisé pour la prévision des crues, il peut comprendre les

10

deux étapes supplémentaires suivantes :

- comparaison 215 du débit calculé (et éventuellement corrigé) avec un ou plusieurs débits seuils prédéterminés correspondant à différents degrés de gravité ;
- déclenchement 216 d'une alerte à un degré de gravité correspondant au seuil atteint.

15

L'invention concerne également un procédé de détermination de données destinées à être utilisées dans un calcul de débit tel que défini ci-dessus. Ce procédé comprend les étapes 23, 24, 26 à 28 de la phase d'initialisation 21 du procédé global, et permet par exemple de déterminer la densité  $\rho(\tau)$  de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours  $\tau$ .

20

Enfin, l'invention concerne aussi un système de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant. Ce système comprend par exemple une pluralité de capteurs de pluie permettant d'estimer directement ou indirectement les quantités d'eau élémentaires déversées (pluie nette) par les bassins versants élémentaires. Ce système comprend également des moyens de calcul du débit à partir :

25

- de ces données de pluie issues des capteurs ; et
- de données extérieures générées par la mise en oeuvre du procédé de détermination de données discuté ci-dessus (et correspondant à la phase d'initialisation 21 du procédé global).

30

Ces moyens de calcul effectuent par exemple le produit de convolution entre la

densité  $\rho(\tau)$  (correspondant aux données extérieures) et la pluie  $P(t')$  (correspondant aux données issues de capteur).

## REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire (32) d'un bassin versant (31), caractérisé en ce qu'il comprend :

- \* une phase d'initialisation (21), comprenant les étapes suivantes :
  - découpage (23) dudit bassin versant en un ensemble de bassins versants élémentaires ;
  - association (24) à chacun desdits bassins versants élémentaires d'une première donnée représentative de la distance hydraulique ( $L$ ) entre ledit bassin versant élémentaire et ledit exutoire, et d'une seconde donnée représentative de la durée de parcours ( $\tau$ ) de ladite distance hydraulique par de l'eau déversée par ledit bassin versant élémentaire ;
- \* une phase de détermination (22) dudit débit, comprenant périodiquement les étapes suivantes :
  - estimation (29) d'une quantité d'eau de pluie élémentaire déversée par chacun desdits bassins versants élémentaires ;
  - calcul (210) du débit à l'exutoire, à partir desdites quantités d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensiblement égal à ladite durée de parcours associée au bassin versant élémentaire correspondant.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite durée de parcours ( $\tau$ ) affectée à chaque quantité d'eau élémentaire tient compte d'une vitesse d'écoulement moyenne sur la distance hydraulique ( $L$ ) parcourue par ladite quantité d'eau élémentaire.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que ladite vitesse d'écoulement moyenne est fixée en fonction d'au moins un paramètre appartenant au groupe comprenant :

- la pente et/ou l'occupation et/ou la nature d'un sol situé sur une face inclinée dudit bassin versant, et sur lequel passe au moins une portion d'au moins une desdites distances hydrauliques ;
- la pente et/ou la rugosité d'un lit du réseau hydrographique associé audit

bassin versant, et dans lequel passe au moins une portion d'au moins une desdites distances hydrauliques.

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite durée de parcours ( $\tau$ ) affectée à chaque quantité d'eau élémentaire tient compte d'une vitesse d'écoulement variable sur la distance hydraulique (L) parcourue par ladite quantité d'eau élémentaire.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite vitesse d'écoulement variable est fonction d'au moins une condition géographique et/ou au moins un phénomène hydraulique lié à au moins un paramètre du bassin versant élémentaire appartenant au groupe comprenant :

10

- la pente globale ;
- la pente locale ; et
- les conditions d'écoulement locales.

15

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ladite phase d'initialisation (21) comprend également une étape de détermination (28) d'une densité ( $\rho(\tau)$ ) de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours ( $\tau$ ) de la distance hydraulique (L).

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que ladite phase d'initialisation (21) comprend également :

20

- une étape de détermination (26) de l'ordre (n) du bassin versant, et
- une étape de détermination (27) de la durée de parcours moyenne ( $\tau$ ), et en ce que ladite densité de répartition est fonction dudit ordre du bassin versant et/ou de ladite durée de parcours moyenne.

25

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 et 7, caractérisé en ce que ladite densité de répartition s'écrit sous la forme :

$$\rho(\tau) = \left(\frac{n}{2\tau}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{n}{2}-1\right)!} \cdot \tau^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n\tau}{2}}$$

30

où :

- n est l'ordre du bassin versant ;
- $\tau$  est la durée de parcours de la distance hydraulique ;

- $\tau$  est la durée de parcours moyenne ;
- $\gamma$  symbolise la fonction gamma.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 et 8, caractérisé en ce que ladite durée de parcours moyenne ( $\tau$ ) est fonction d'une distance hydraulique moyenne, ladite distance hydraulique moyenne étant déterminée au moyen d'une technique consistant à traiter une image représentant un réseau hydrographique correspondant audit bassin versant, puis, par voie informatique, à mesurer sur l'image traitée toutes lesdites distances hydrauliques associées à l'ensemble des bassins versants élémentaires, et à moyenner lesdites distances hydrauliques mesurées.

10 10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, caractérisé en ce que ledit calcul du débit à l'exutoire consiste à effectuer un produit de convolution temporelle entre :

- d'une part, une première fonction représentative de la quantité d'eau élémentaire déversée par chaque bassin versant élémentaire en fonction du temps, et
- d'autre part, une seconde fonction représentative de ladite densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours.

15 11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit produit de convolution s'écrit sous la forme :

$$Q(t) = \int_0^t \rho(\tau) \bar{P}(t-\tau) S d\tau$$

20 où : -  $Q(t)$  est le débit à l'exutoire à un instant  $t$  par rapport à un instant d'origine ( $t = 0$ ) d'un épisode pluvieux ;  
 -  $\rho(\tau)$  est le nombre de bassins versants élémentaires affectés d'une durée de parcours  $\tau$  pouvant varier entre 0 et  $t$  ;  
 -  $\bar{P}(t') = P(t - t')$  est une quantité d'eau élémentaire moyenne déversée par chaque bassin versant élémentaire à un instant donné  $t'$ ,  $t'$  correspondant à l'instant  $t$  diminué de la durée de parcours  $\tau$  et pouvant varier entre  $t' = 0$

(lorsque  $\tau = t$ ) et  $t' = t$  (lorsque  $\tau = 0$ ) ;

-  $S$  est la surface du bassin versant.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que ladite phase de détermination (22) comprend de plus une étape de correction (213) du débit calculé, en fonction d'au moins un paramètre (214) appartenant au groupe comprenant :

- une lame d'eau préliminaire qui sature le sol du bassin versant ;
- un effet de laminage lors de l'écoulement de l'eau ;
- une hétérogénéité géomorphologique du bassin versant ;
- au moins une valeur de débit calculée et/ou au moins une valeur de débit mesurée lors d'un épisode pluvieux antérieur ;
- au moins une information externe concernant notamment l'époque de l'année et/ou les conditions climatiques.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que ladite étape d'estimation (29) d'une quantité d'eau élémentaire déversée met en oeuvre des moyens de mesure de données pluviométriques (211) appartenant au groupe comprenant :

- des pluviographes ;
- des dispositifs de prise d'images (notamment des radars et/ou des satellites) ;
- des dispositifs d'analyse d'images.

14. Procédé selon la revendication 13, caractérisé en ce que l'implantation desdits moyens de mesure est fonction d'au moins un des paramètres appartenant au groupe comprenant :

- la superficie et/ou la forme et/ou le relief et/ou l'orientation du bassin versant ;
- la direction de propagation des perturbations pluvieuses dominantes.

15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, caractérisé en ce qu'un coefficient d'écoulement (212) est associé à chacun des bassins versants élémentaires, et en ce que, pour chaque bassin versant élémentaire, la quantité d'eau de pluie élémentaire déversée est estimée à partir d'une quantité d'eau de pluie élémentaire reçue

5

10

15

20

25

30

lors d'un épisode pluvieux, par pondération par le coefficient d'écoulement dudit bassin versant élémentaire.

16. Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit coefficient d'écoulement est sensiblement homogène sur l'ensemble du bassin versant.

5 17. Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que le bassin versant est divisé en au moins deux zones sur chacune desquelles ledit coefficient d'écoulement est sensiblement homogène, chacune desdites zones comprenant au moins un bassin versant élémentaire.

10 18. Procédé selon l'une quelconque des revendications 15 à 17, caractérisé en ce que ledit coefficient d'écoulement est fixé en fonction d'au moins un paramètre appartenant au groupe comprenant :

- le relief du bassin versant ;
- l'état hydrique du bassin versant au début de l'épisode pluvieux ;
- la nature et/ou la couverture du sol du bassin versant.

15 19. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, caractérisé en ce que la quantité d'eau de pluie élémentaire reçue lors d'un épisode pluvieux est sensiblement identique pour tous les bassins versants élémentaires du bassin versant.

20 20. Procédé selon l'une quelconque des revendications 15 à 18, caractérisé en ce que le bassin versant est divisé en au moins deux groupes de bassins versants élémentaires, les bassins versants élémentaires d'un même groupe recevant une quantité d'eau de pluie élémentaire sensiblement identique lors d'un épisode pluvieux.

25 21. Procédé selon la revendication 20, caractérisé en ce que la composition desdits groupes est variable dans le temps, de façon à prendre en compte le déplacement, par rapport au bassin versant, d'une source d'eau atmosphérique libérant lesdites quantités d'eau de pluie élémentaires reçues.

22. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 21, caractérisé en ce que la période de la phase de détermination (22) du débit est comprise entre environ une minute et une heure.

30 23. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que la phase de détermination du débit comprend également ;

- une étape de comparaison (215) dudit débit calculé avec au moins un débit seuil prédéterminé ;
- une étape de déclenchement (216) d'une alerte si le débit calculé est supérieur audit débit seuil prédéterminé.

5       **24.**    Procédé de détermination de données destinées à être utilisées dans un calcul d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- découpage dudit bassin versant en un ensemble de bassins versants élémentaires ;
- association à chacun desdits bassins versants élémentaires d'une première donnée représentative de la distance hydraulique entre ledit bassin versant élémentaire et ledit exutoire, et d'une seconde donnée représentative de la durée de parcours de ladite distance hydraulique par de l'eau déversée par ledit bassin versant élémentaire.

15      **25.**    Procédé selon la revendication 24, caractérisé en ce qu'il comprend également une étape de détermination d'une densité de répartition des bassins versants élémentaires en fonction de la durée de parcours de la distance hydraulique.

20      **26.**    Procédé selon la revendication 25, caractérisé en ce qu'il comprend également :

- une étape de détermination de l'ordre du bassin versant ; et
- une étape de détermination de la durée de parcours moyenne ;

et en ce que ladite densité de répartition est fonction dudit ordre du bassin versant et/ou de ladite durée de parcours moyenne.

25      **27.**    Système de détermination d'un débit d'eau à l'exutoire d'un bassin versant, ledit système recevant des données générées par la mise en oeuvre d'un procédé de détermination de données selon l'une quelconque des revendications 24 à 26, caractérisé en ce qu'il comprend :

- au moins un capteur permettant d'estimer une quantité d'eau élémentaire déversée par chacun desdits bassins versants élémentaires ;
- des moyens de calcul du débit à l'exutoire, à partir desdites quantités d'eau élémentaires affectées chacune d'un retard sensiblement égal à ladite

**durée de parcours associée au bassin versant élémentaire correspondant.**

1/3

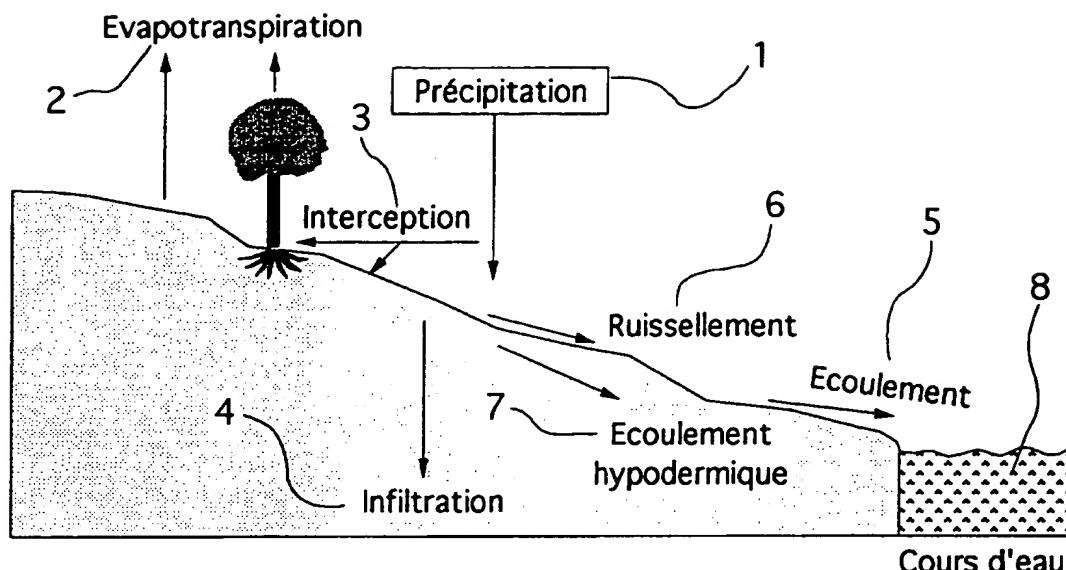


Fig. 1

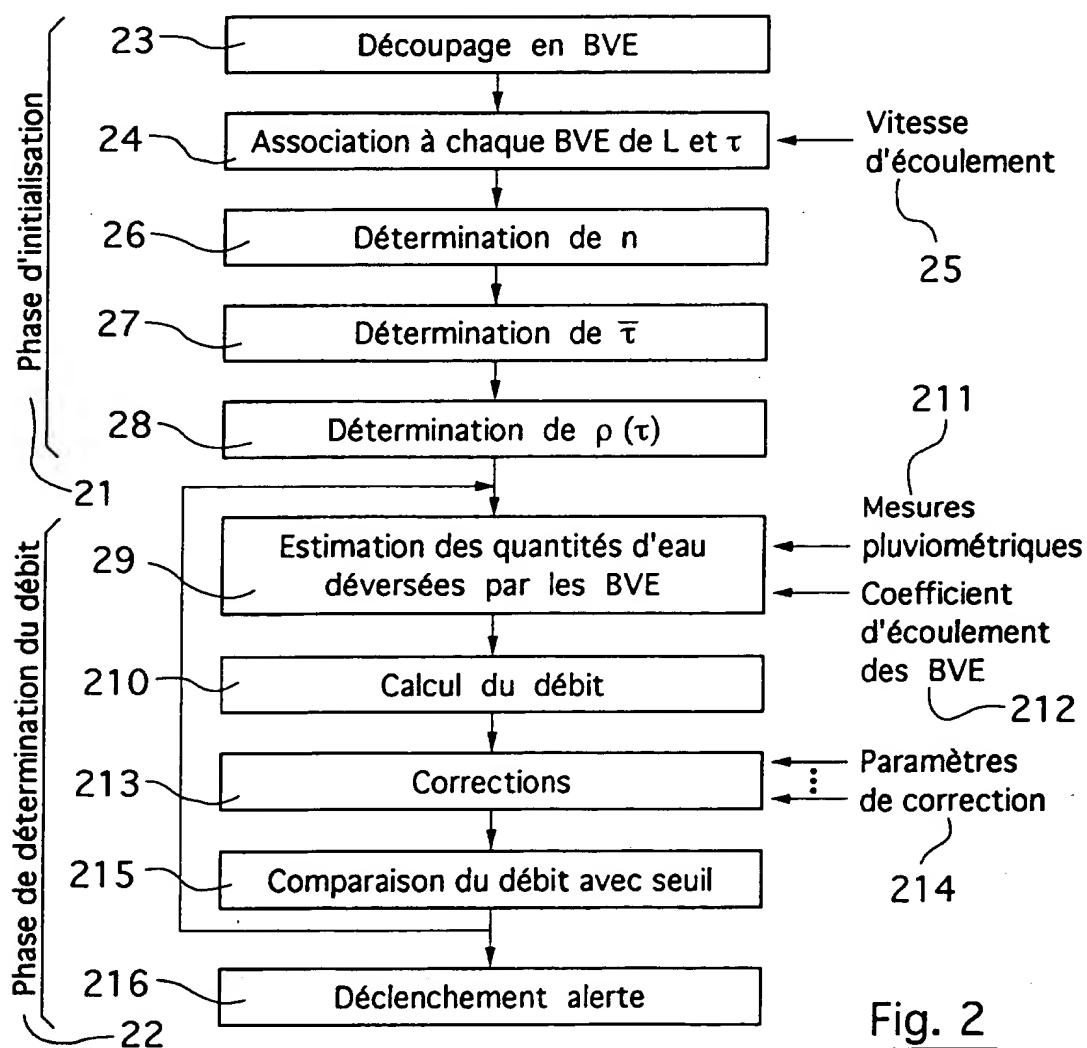


Fig. 2

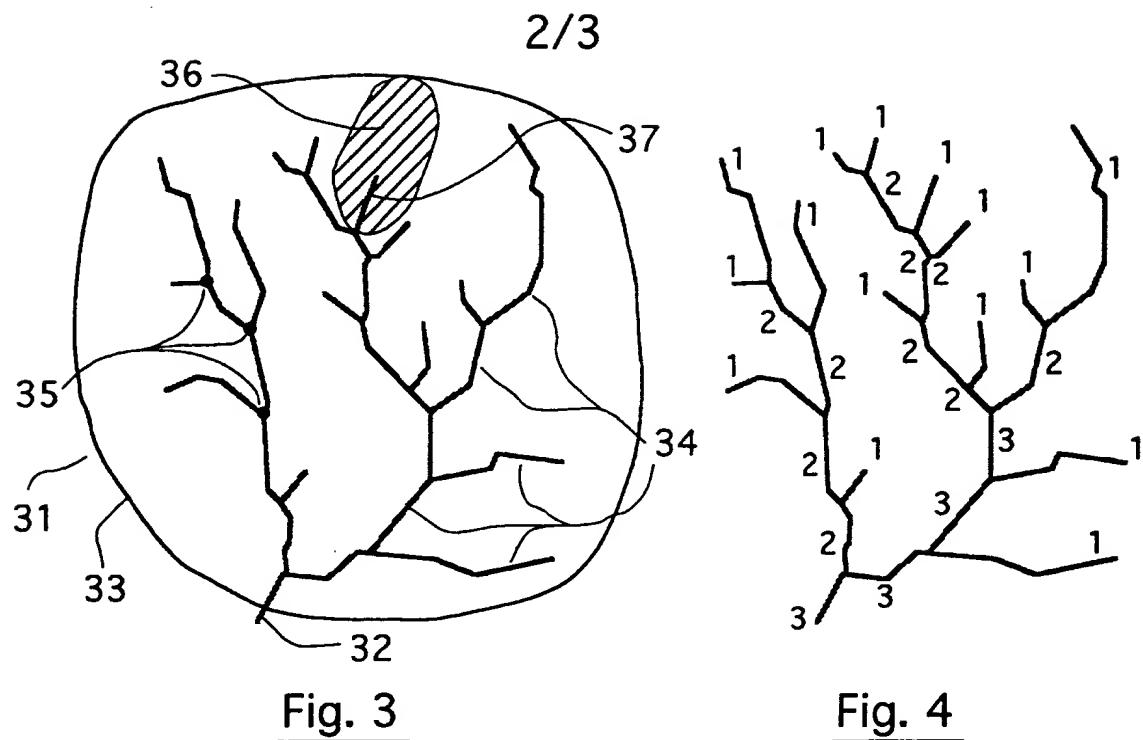


Fig. 3

Fig. 4

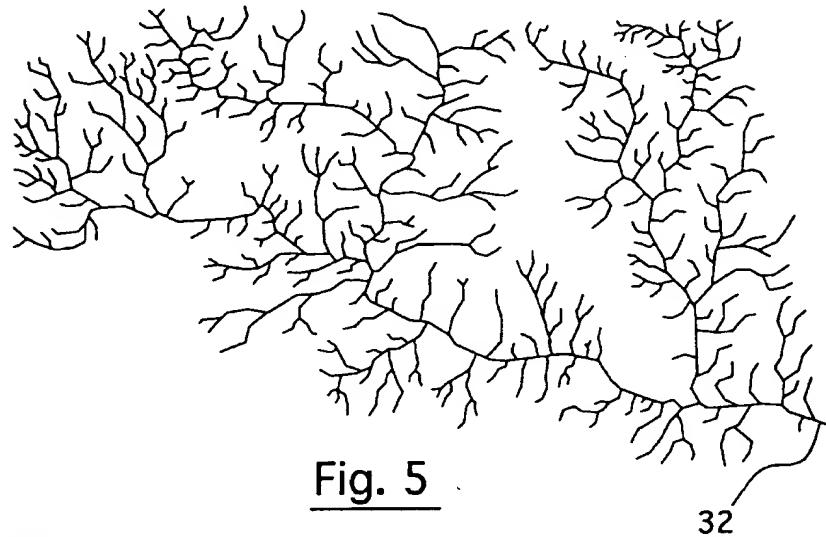


Fig. 5

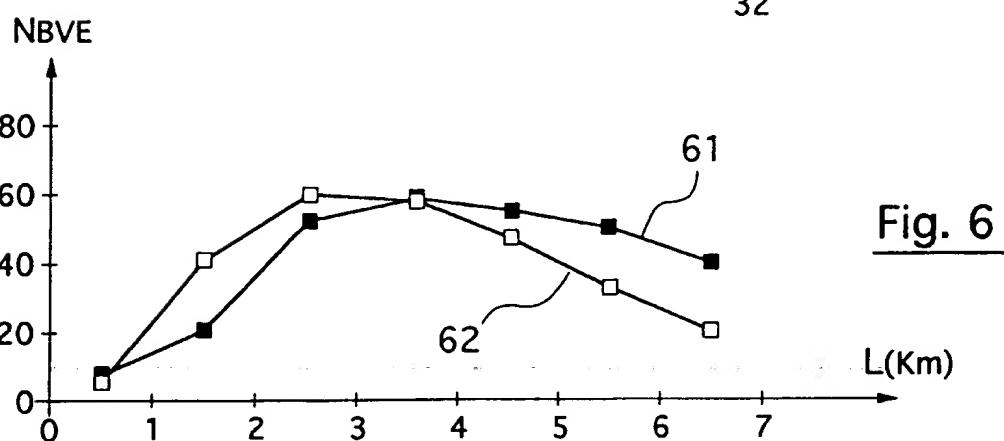


Fig. 6

3/3

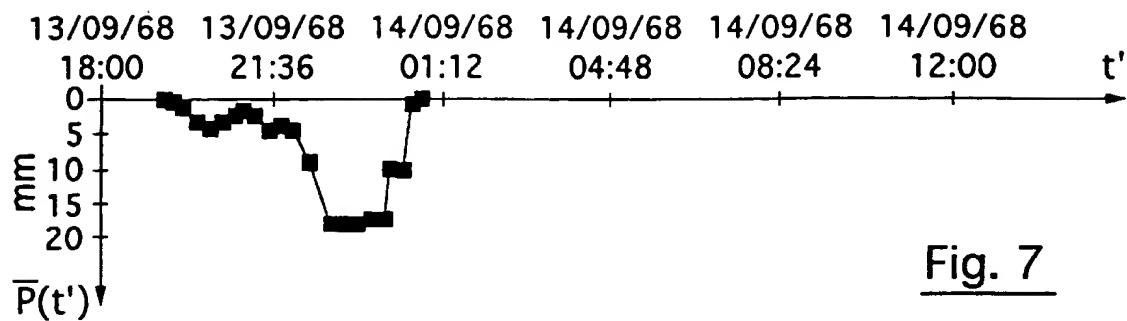


Fig. 7

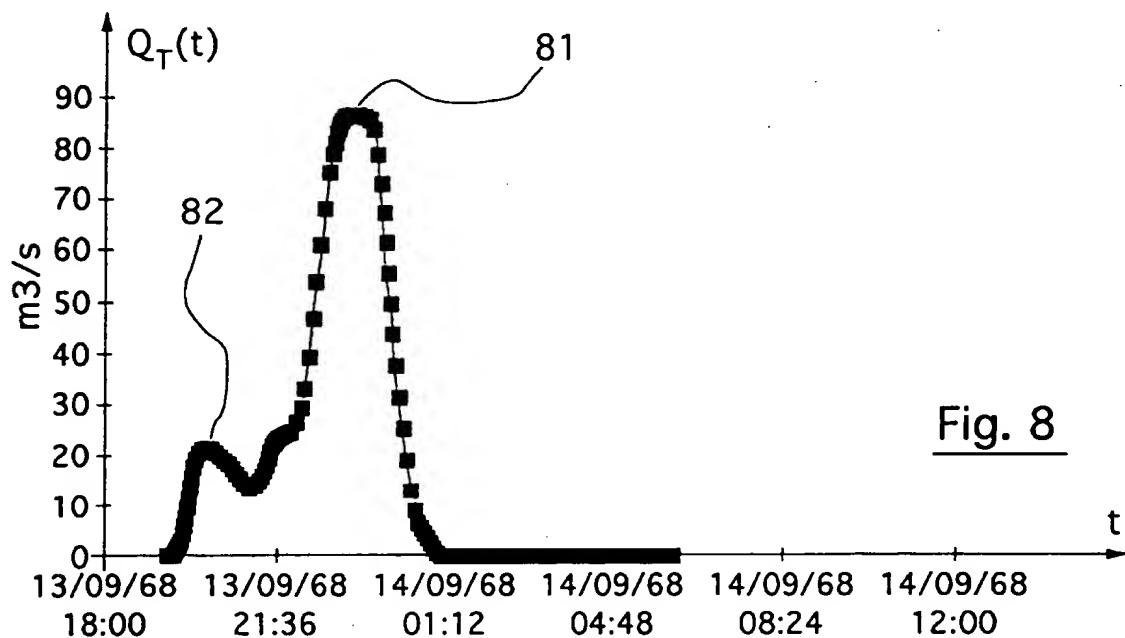


Fig. 8

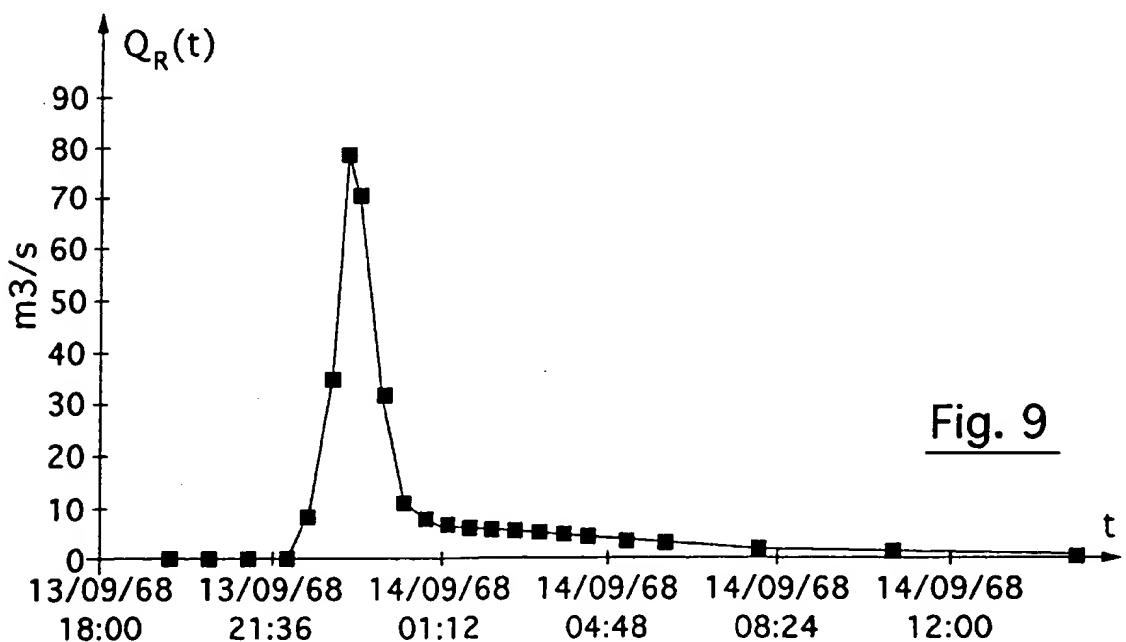


Fig. 9

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée												
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes													
A	FR-A-2 703 472 (RHEA) 7 Octobre 1994 * le document en entier * ---	1												
A	EP-A-0 578 544 (RHEA) 12 Janvier 1994 * le document en entier * ---	1												
A	PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON FRONTIERS OF MASSIVELY PARALLEL COMPUTATION, FAIRFAX, OCT. 10 - 12, 1988, no. SYMP. 2, 10 Octobre 1988 MILLS R, pages 249-256, XP 000078217 DEVANEY J E ET AL 'ESTIMATING WATER FLOW THROUGH A HILLSLOPE USING THE MASSIVELY PARALLEL PROCESSOR' * le document en entier * ---	1												
A	WATER RESOURCES RESEARCH, AUG. 1982, USA, vol. 18, no. 4, ISSN 0043-1397, pages 887-903, RODRIGUEZ-ITURBE I ET AL 'On the climatic dependence of the IUH: a rainfall-runoff analysis of the Nash model and the geomorphoclimatic theory' * le document en entier * ---	1												
A	WATER RESOURCES RESEARCH, OCT. 1980, USA, vol. 16, no. 5, ISSN 0043-1397, pages 855-862, GUPTA V K ET AL 'A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology' * le document en entier * -----	1												
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)												
		GO1W GO1S												
1	Date d'achèvement de la recherche 18 Décembre 1995	Examinateur Hoekstra, F												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X : particulièrement pertinent à lui seul</td> <td>T : théorie ou principe à la base de l'invention</td> </tr> <tr> <td>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie</td> <td>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.</td> </tr> <tr> <td>A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général</td> <td>D : cité dans la demande</td> </tr> <tr> <td>O : divulgation non-écrite</td> <td>L : cité pour d'autres raisons</td> </tr> <tr> <td>P : document intercalaire</td> <td>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</td> </tr> </tbody> </table>			CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		X : particulièrement pertinent à lui seul	T : théorie ou principe à la base de l'invention	Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie	E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général	D : cité dans la demande	O : divulgation non-écrite	L : cité pour d'autres raisons	P : document intercalaire	& : membre de la même famille, document correspondant
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES														
X : particulièrement pertinent à lui seul	T : théorie ou principe à la base de l'invention													
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie	E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.													
A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général	D : cité dans la demande													
O : divulgation non-écrite	L : cité pour d'autres raisons													
P : document intercalaire	& : membre de la même famille, document correspondant													